

敦煌周辺の天然水と中国の砂漠の析出塩の化学組成

著者	北野 康, 馬淵 久夫, 三浦 定俊, 西浦 忠輝, 佐野 千絵, 朽津 信明, 門倉 武夫, 日下部 実, 段 修業
雑誌名	保存科学
号	33
ページ	1-26
発行年	1994-03-31
URL	http://id.nii.ac.jp/1440/00003482/



敦煌周辺の天然水と中国の砂漠の析出塩の化学組成

北野 康^{*1}・馬淵 久夫^{*2}・三浦 定俊
西浦 忠輝・佐野 千絵・朽津 信明
門倉 武夫・日下部 実^{*3}・段 修 業^{*4}

1. はじめに

敦煌莫高窟は4世紀中葉から13世紀頃までにわたる彫刻や壁画などを有する貴重な世界遺産である。その莫高窟の壁画の破損は憂慮すべき状態にあり、日本は中国との協力体制のもとに、その保存・修復に努め、1986年10月文化庁により、敦煌莫高窟壁画保存修復協力会議が設立された。その後東京国立文化財研究所が中心となり精力的に活動し、1991年以降合意書に基づいて、年2回同地域にそれぞれ1週間ほど滞在し、保存修復のための調査を継続して現在までに大きな成果をあげている¹⁻⁸⁾。

近年、大気汚染および水質汚濁は地球規模で進み、地球環境問題として国際的に政府間で取りあげられている。地球環境問題の中で最も難しいとされている地球温暖化をとってみても、地球温暖化が進むと40年から100年後には地球の平均気温は2℃ほど上昇し、地球全体としては降水量は増加し、降水は集中豪雨化するであろうとシミュレートされている⁹⁻¹⁷⁾。敦煌地域は1971年、1979年にも洪水に遭遇し、最近では1993年6月10日には1日に20mmにもおよぶ豪雨があった。集中豪雨の他に酸性雨の到来も将来は予想され¹⁴⁾、大気と水は莫高窟周辺の自然環境にとって、検討すべき重要課題の1つである。そこで、莫高窟壁画の保存・修復には基本的に岩石-水および岩石-空気の間での相互作用を無視するわけにはいかないと考え^{11-14,18-26)}、同地域の天然水

表-1 X線粉末回折による分析結果(朽津・段, 1992)

No.	説 明	石 英	方解石	斜長石	岩 塩	カオリナイト	雲母類	ドロマイト	角閃石	輝石類	石 膏
a	大泉河析出物	冊	+	+	冊	土					
b	194窟岩体	冊	冊	+	冊			+			
c	194窟岩体	冊	冊	+	冊	+	土	+			
d	194窟析出物	冊	+	+	冊						
e	194窟析出物	+	+	+	冊						
f	53窟岩体	冊	冊	+		+	+	冊	+		
g	53窟岩体	冊	冊	冊	*	+	+	冊	+	+	
h	53窟析出物										冊
i	53窟析出物	+									冊

石英 (SiO_2), 方解石 (CaCO_3), 斜長石 ($(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_6$), 岩塩 (NaCl), カオリナイト ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), 雲母類 ($\text{K}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_{4-6}(\text{Fe}, \text{Al}, \text{Ti})_{0-2}[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH}, \text{F})_4$), ドロマイト ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), 角閃石 ($\text{NaCa}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_4\text{AlSi}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), 輝石類 ($(\text{Ca}, (\text{Mg}, \text{Fe}))\text{SiO}_3$), 石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (雲母類, 角閃類の化学組成は, 代表的なもの。実際にはもっと複雑な固溶体。)

量は, 冊 > 冊 > 冊 > + > 土

* : 敦煌研究院の分析では53窟岩体に岩塩も検出されたが, 東京国立文化財研究所の分析では発見されなかった。

* 1 名古屋大学・椋山女学園大学名誉教授

* 2 東京国立文化財研究所名誉研究員

* 3 岡山大学地球内部研究センター

* 4 中国・敦煌研究院

および析出塩類の調査を行った。

元来、砂漠地域は大気中の水蒸気の供給源である^{24,28,29)}。敦煌では年間降水量が約 30 mm なのに³⁾、蒸発可能量は 2,600 mm もあるという調査結果もある。水が蒸発して析出塩が生成され、砂漠地域の特にオアシス地帯の砂は、その析出塩で白色を呈している。NaClやCaSO₄・2 H₂Oの析出塩が莫高窟内の壁画の破損に直接関与していることが我々の調査ですでに明らかにされた^{1,2)}。すなわち、表-1¹⁾に示すように莫高窟内の 53 窟では析出した石膏 (CaSO₄・2 H₂O) が、また 194 窟では岩塩 (NaCl) が壁画の顔料剥落の原因になっている。また敦煌周辺の天然水の化学分析は、すでに日本と中国で行われ報告されている²⁷⁾。それによると、敦煌周辺の天然水の化学的性質は、地球上の一般的な陸水と異なっている。

そこで今回は、敦煌周辺の天然水と中国の砂漠地域における析出塩の化学組成について、総説的に論述する。

2. 敦煌周辺の天然水の化学組成とその特徴

表-2 (3 ページ)に敦煌周辺の天然水の化学組成を示す²⁷⁾。これらの天然水は地球上の一般的な陸水である河川水などとは違う化学組成を示している。比較のため、一般的な天然水として世界各地域の河川水、日本各地域の河川水、および雨水と海水の化学組成をそれぞれ表-3²³⁾、4¹²⁾および表-5¹²⁾ (3, 4 ページ)に示す。各表中に天然水的主要成分であるCa²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺などの陽イオン、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻などの陰イオンの各含有量 (meq/l) がそれぞれ陽イオンあるいは陰イオン中で占める割合 (%) および [Mg²⁺濃度, meq./l] / [Ca²⁺濃度, meq./l] の比を示した。

表-2と表-3, 4, 5の値とを比較すると、敦煌周辺の陸水の化学組成には、次の特徴が見られる。(a) SO₄²⁻濃度が大変高い。(b) HCO₃⁻濃度が大変低い。(c) Mg²⁺濃度が高い。(d) 陸水としては、陽イオン中でNa⁺+K⁺の占める割合が高い。

敦煌周辺の陸水の化学組成の以上に示した特徴を理解するには、次の3点の議論が必要である。：(A) 陸水が蒸発する過程で起こる塩類の析出に伴う陸水の化学組成の変化、(B) 敦煌周辺の陸水中のSO₄²⁻の起源、(C) 敦煌周辺の陸水の源水と降水の量と質。

製塩 (食塩製造) に関連し、海水の蒸発に伴う析出塩類と海水の化学組成変化については、かつて詳細に研究された。それによると、海水を蒸発すると、まず水に溶けにくいCaCO₃が析出し、つづいてCaSO₄が析出する。そのために水中のCa²⁺とHCO₃⁻およびSO₄²⁻の濃度は減少する。次いで溶けにくいNaClが析出し、残液はMg²⁺とCl⁻を主成分とする“にがり”になる。さらにこの水が蒸発するとKMgCl₃・6 H₂O (カーナライト) などが析出する³⁰⁾。このことは、次に示す死海の場合にも見られる現象である。天然の陸水の蒸発過程における塩類析出についての研究は多いが、最も精力的に研究された1つの場合は死海であるので、死海のデータについて以下論述する^{24,30-36)}。

イスラエルの死海の北方にも、塩類濃度の高い水がある。死海近辺の地質を見ると火山岩が見られるが、海成堆積物も広く分布しており、死海の水には陸水の他に、海水起源の風送塩は勿論だが、海水自体も或る時期には直接関係していた可能性があるように思われる。死海の水の化学組成は、表-6に示す通りで、[Mg²⁺]/[Ca²⁺]の平衡モル比は3.6である³³⁾。死海の水がこのような化学組成を示すに至った過程をBentorは次のように説明している^{24,31,32)}。すなわち、表-7³¹⁾に示すように、死海には12,000年間にヨルダン川および鉱泉水を通して大量の化学成分が運び込まれ、その死海の水から沈殿物が生じ、現在の死海の水の化学組成が決まっているとしている。それによると、12,000年間にCaCO₃が約57億トン、CaSO₄が約35億トン、そしてNaClが

表一 2 敦煌周辺の天然水の化学組成

	(mg/l)*						cation; meq./l				anion; meq./l				anion, eq. %				cation, eq. %				Mg ²⁺ /Ca ²⁺ eq.-ratio
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻		Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣCa ²⁺ +Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺			
莫高窟地表水	142.28	85.16	239.18	963.19	824.20		7.11	7.01	14.12	20.05	3.92	13.08	17.17	34.17	11.5	38.3	50.2	20.8	20.5	58.7	0.99		
縣城住宅水	70.80	35.27	237.94	67.36	182.50		3.54	2.90	6.44	3.16	3.90	1.90	3.80	9.60	40.6	19.8	39.6	36.9	30.2	32.9	0.82		
飛機場用水	54.46	42.44	67.12	202.08	231.90		2.72	3.49	6.21	5.43	1.10	5.71	4.83	11.64	9.5	49.1	41.5	23.4	30.0	46.7	1.3		
3公理半水	50.08	14.11	92.75	63.82	98.80		2.50	1.16	3.66	1.72	1.52	1.80	2.06	5.38	28.3	33.5	38.3	46.5	21.6	32.0	0.46		
1公理用水	58.52	49.73	57.97	194.99	429.30		2.93	4.09	7.02	8.38	0.95	5.51	8.94	15.40	6.2	35.8	58.1	19.0	26.6	54.4	1.4		
大泉水	100.04	53.75	93.97	370.48	502.30		5.00	4.42	9.42	13.05	1.54	10.47	10.46	22.47	6.9	46.6	46.6	22.2	19.7	58.1	0.89		
大拉牌水	104.20	17.15	76.27	342.12	766.80		5.21	1.41	6.62	20.27	1.25	9.66	15.98	26.89	4.6	35.9	59.4	19.4	5.2	75.4	0.27		
条湖水	99.07	10.46	74.44	253.84	439.00		4.95	0.86	5.81	11.73	1.22	7.17	9.15	17.54	7.0	40.9	52.2	28.2	4.9	66.9	0.17		
佛爺庙机井水	87.22	29.91	140.34	163.08	322.10		4.36	2.46	6.82	6.80	2.30	4.61	6.71	13.62	16.9	33.8	49.3	32.0	18.1	49.9	0.57		
北京水	95.84	58.04	94.58	245.87	1009.00		4.79	4.78	9.57	19.95	1.55	6.95	21.02	29.52	5.3	23.5	71.2	16.2	16.2	67.6	1.0		
交匯處水	234.52	25.78	115.94	926.48	737.80		11.73	2.12	13.85	29.59	1.90	26.17	15.37	43.44	4.4	60.2	35.4	27.0	4.9	68.1	0.18		
党河水	38.54	11.64	67.51	58.50	264.20		1.93	0.96	2.89	5.38	1.12	1.65	5.50	8.27	13.5	20.0	66.5	23.3	11.6	65.0	0.50		
平均值	94.63	36.12	113.17	279.32	483.99		4.73	2.97	7.70	12.13	1.86	7.89	10.08		17.9	36.5	50.7	26.2	17.5	56.3	0.67		

* 段修業 (1988)

表一 3 世界各域の河川水の化学組成 (Kitano, 1991)

河川水 (地域別)	mg/l										cation; meq./l					anion; meq./l					anion; eq. %					Mg ²⁺ /Ca ²⁺ eq.-ratio											
	Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺		K ⁺		HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Σcation		HCO ₃ ⁻		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		Σanion		HCO ₃ ⁻		Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺		K ⁺		ΣNa ⁺ +K ⁺		
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σcation	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σanion	HCO ₃ ⁻		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	
北米	21	5	9	1.4	68	8	20	1.05	0.41	0.39	0.036	1.886	1.115	0.226	0.417	1.758	63.4	12.9	23.7	55.7	21.7	20.7	1.9	22.6	0.39												
南米	7.2	1.5	4	2	31	4.9	4.8	0.36	0.12	0.17	0.051	0.701	0.508	0.138	0.100	0.746	68.0	18.5	13.4	51.4	17.1	24.3	7.3	31.6	0.33												
ヨーロッパ	31.1	5.6	5.4	1.7	95	6.9	24	1.56	0.46	0.23	0.043	2.293	1.557	0.195	0.500	2.252	69.1	8.7	22.2	68.0	20.0	10.0	1.9	11.9	0.29												
アジア	18.4	5.6	9.3	7.9	8.7	8.7	8.4	0.92	0.46	0.336	—	1.716	1.295	0.246	0.175	1.716	75.5	14.3	10.2	53.6	26.8	19.6	—	19.6	0.50												
アフリカ	12.5	3.8	11	—	43	12.1	13.5	0.63	0.31	0.48	—	1.42	0.705	0.342	0.281	1.328	53.1	25.8	21.1	44.4	21.8	33.8	—	33.8	0.49												
大西洋*	10.5	2.5	4.2	1.4	37	5.7	7.7	0.53	0.21	0.18	0.036	0.956	0.61	0.16	0.16	0.93	65.6	17.2	17.2	55.4	22.0	18.8	3.8	22.6	0.40												
印度洋*	21.6	5.4	8.5	2.5	94.9	6.8	7.9	1.08	0.44	0.37	0.064	1.954	1.56	0.19	0.16	1.91	81.7	9.9	8.4	55.3	22.5	18.9	3.3	22.2	0.41												
極海*	16.1	1.3	8.8	1.2	63.5	11.8	15.9	0.81	0.11	0.38	0.031	1.331	1.04	0.33	0.33	1.7	61.2	19.4	19.4	60.9	8.3	28.5	2.3	30.8	0.14												
太平洋*	13.9	3.6	5.2	1.2	55.4	5.1	9.2	0.70	0.30	0.23	0.031	1.261	0.91	0.14	0.19	1.24	73.4	11.3	15.3	55.5	23.8	18.2	2.5	20.7	0.43												
全世界平均	13.3	3.1	5.3	1.5	51.7	6.0	8.7	0.67	0.26	0.23	0.038	1.198	0.85	0.17	0.18	1.2	70.8	14.2	15.0	55.9	21.7	19.2	3.2	22.4	0.39												

* 各海洋に注ぎこむ河川水の平均値

表一4 日本各域の河川水の化学組成 (北野, 1984)

河川水 (地域別)	mg/l								cation; meq./l				anion; meq./l						anion; eq. %				cation; eq. %				Mg ²⁺ /Ca ²⁺ eq.-ratio
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	採水 河川数	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σcation	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺		
北海道	8.3	2.3	9.2	1.45	33.9	9.0	10.7	22	0.415	0.189	0.400	0.037	1.041	0.556	0.254	0.223	1.033	53.8	24.6	21.6	39.9	18.2	38.4	3.6	42	0.46	
東北	7.7	1.9	7.3	1.06	19.9	7.9	17.6	35	0.385	0.156	0.317	0.027	0.885	0.326	0.223	0.367	0.916	35.6	24.3	40.1	43.5	17.6	35.8	3.1	38.9	0.40	
関東	12.7	2.9	7.3	1.43	42.4	6.1	15.9	11	0.635	0.239	0.317	0.037	1.228	0.695	0.172	0.123	0.99	70.2	17.4	12.4	51.7	19.5	25.8	3.0	28.8	0.38	
中部	8.9	1.7	4.8	1.05	30.1	3.9	7.7	42	0.445	0.14	0.209	0.027	0.821	0.493	0.110	0.160	0.763	64.6	14.4	21.0	54.2	17.1	25.5	3.3	28.8	0.32	
近畿	7.6	1.3	5.5	1.04	27.4	5.3	7.4	28	0.380	0.107	0.239	0.027	0.753	0.447	0.150	0.154	0.753	60.0	17.9	20.5	50.5	14.2	31.7	3.6	35.3	0.28	
中国	6.7	1.1	6.5	0.94	27.2	6.6	4.4	25	0.335	0.091	0.283	0.024	0.733	0.446	0.186	0.092	0.724	61.6	25.7	12.7	45.7	12.4	38.6	3.3	41.9	0.27	
四国	10.6	1.5	3.8	0.66	37.2	2.4	5.7	19	0.530	0.123	0.165	0.017	0.835	0.610	0.068	0.119	0.797	76.5	8.5	14.9	63.5	14.7	19.8	2.0	21.8	0.23	
九州	10.0	2.7	8.6	1.84	40.9	4.6	13.1	43	0.500	0.222	0.374	0.047	1.143	0.670	0.130	0.273	1.073	62.4	12.1	25.4	43.7	19.4	32.7	4.1	36.8	0.44	
全国平均	8.8	1.9	6.7	1.19	31.0	5.8	10.6	22.5	0.453	0.156	0.291	0.030	0.917	0.508	0.164	0.221	0.893	56.9	18.4	24.7	48.0	17.0	31.7	3.3	35	0.35	

表一5 雨水および海水の化学組成 (北野, 1984)

	mg/l							cation; meq./l				anion; meq./l				anion; eq. %				cation; eq. %				Mg ²⁺ /Ca ²⁺ eq.-ratio	
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σcation	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺		ΣNa ⁺ +K ⁺
雨水(日本平均値)	0.97	0.36	1.1	0.011	—	1.1	4.5	0.049	0.030	0.048	0.007	0.134	(0.014)	0.03	0.09	—	10.4	22.4	67.2	36.6	22.4	35.8	5.2	41.0	0.61
標準海水	400	1,300	10,500	380	140	19,000	2,650	20	107	456.5	9.7	593.2	2.30	536.7	55.2	594.2	0.39	90.3	9.3	3.4	18.0	77.0	1.6	78.6	5.3

表一 6 死海表面水の化学組成 (Neev and Emery, 1967)

	g/l	meq./l	各陽イオンあるいは各陰イオンの含有量の割合 (% eq)
Na ⁺	40.3	1750	30
K ⁺	6.8	180	3
Mg ²⁺	37.8	3130	52
Ca ²⁺	17.1	860	15
Cl ⁻	206.2	5810	98.7
Br ⁻	4.8	60	1
HCO ₃ ⁻	0.24	4	0.07
SO ₄ ²⁻	0.61	10	0.2

表一 7 過去 12000 年間にヨルダン川および鉱泉水を通して死海に供給されたイオン量と沈殿した量および現在の死海の水全部が含んでいるイオン量 (Bentor, 1961)

	推定量 (百万トン)				実測量 (百万トン)
	鉱泉	ヨルダン川	供給総量	沈殿物量	死海の水の溶存量
Na ⁺	2956	3676	6632	1636	4996
K ⁺	1905	215	2120	—	1081
Ca ²⁺	4436	1161	5597	3277	2259
Mg ²⁺	4964	1036	6000	—	6000
Cl ⁻	29504	6869	36373	2522	29747
Br ⁻	391	63	454	—	847
SO ₄ ²⁻	13	2531	2544	2467	77
HCO ₃ ⁻	15	3451	3466	3423	43

約 42 億トン沈殿し、沈殿した塩類の重量比は、NaCl : CaSO₄ : CaCO₃ = 7 : 6 : 10 となる。

上記のように、天然水が蒸発して塩類が析出したあとの水では HCO₃⁻と SO₄²⁻の濃度が小さくなるのが一般的である。敦煌周辺でも CaSO₄や CaCO₃が析出しており、そのために敦煌周辺の陸水の Ca²⁺濃度は減少し、陽イオンでは Na⁺+K⁺や Mg²⁺の占める割合が大きくなり、HCO₃⁻の陰イオンの占める割合は小さくなったデータが得られている。しかし、蒸発に伴ない水中の SO₄²⁻濃度は低くなるはずだが、表一 2 が示すように敦煌周辺の天然水の SO₄²⁻濃度は高い。従って SO₄²⁻の起源が問題となるので、それについては次項で論述する。

なお、陸水（主として河川水）が海洋に運びこむ非海水起源、すなわち主として岩石などからの溶出などに関係する化学成分は、蒸発による析出ではなく海洋堆積物との化学平衡論的な関係で、海水から現在も表一 8¹⁴⁾に示す沈殿物として海底に堆積していると、北野は報告している^{12-14,23)}。

表一 8 1 年間に河川水が運ぶ溶存主要化学成分によって海洋で生成される沈澱物の量 (北野, 1992)

化学沈澱物	堆 積 量 (トン)
	1 年間
FeS ₂ (黄鉄鉱)	20×10 ⁷
カオリン	130×10 ⁷
MgCO ₃	5×10 ⁷
CaCO ₃	120×10 ⁷ ~110×10 ⁷
SiO ₂	4×10 ⁷
Na-モンモリロナイト (イオン交換)	80×10 ⁷
Na-モンモリロナイト	240×10 ⁷
Ca-モンモリロナイト	130×10 ⁷ ~260×10 ⁷
緑泥石 (クロライト)	50×10 ⁷
イライト	130×10 ⁷

3. 敦煌周辺の天然水の SO₄²⁻の起源 —地質環境と SO₄²⁻の起源—

陸水中の SO₄²⁻の起源としては次のものが考えられる^{14,38)}：(a) 石油・石炭などの化石燃料燃焼，(b) 海洋からの海水飛沫の他に海水からのジメチル硫黄の大気中への放出³⁹⁾，(c) 大陸上の岩石中のイオウを含む物質からの溶出。このうち，(a) と (b) は，大気から降水と降下物によって河川水などに供給され，(c) は析出塩を含む岩石中の硫酸塩，イオウや硫化物などに由来するものと考えられ，地域的な地質環境に支配される。(b) も NaCl などの析出塩を砂上にもつ砂漠地域では，一般の大陸上とは違ってや、複雑ではあるが，陸水中への (b) からの寄与量の推定は可能である。(a) と (c) は地域によって大きく違い，敦煌周辺の天然水にはこれら 2 つが考慮されなければならない。現在のところ，敦煌周辺の降水量や降水中の SO₄²⁻濃度から見ると，降水は陸水中の SO₄²⁻濃度を支配する重要な因子とは考えられず，また降下物による供給量の検討は必要ではあるが，現在のところ結論的には (c) に特に注目する必要がある。それには，敦煌周辺の地質環境を知っておく必要があるので，まずそれを紹介し，次いで SO₄²⁻の起源に言及する。

3-1. 敦煌周辺の地質環境

朽津・段によって次のように報告されている¹⁾。敦煌は中国甘肅省北西部，タクラマカン砂漠の東端に位置する。敦煌の南側には前震旦系の複合岩体である“敦煌群”が分布し，三危山や鳴沙山などを形成している。これらの山々の北側には扇状地が形成されている。莫高窟は敦煌市街地の南東約 25 km にあり，前を大泉河が流れている。この大泉河によって作られた古期扇状地堆積物を大泉河が更に浸食してできた崖の西側に掘られているのが莫高窟である。

前震旦系の複合岩の基盤岩である敦煌群の岩体は，砂岩，泥岩，石灰岩，片岩，片麻岩，ホルンフェルス，大理石などで構成され，花崗岩の貫入がみられる。古期扇状地堆積物は主として礫からできており，礫は花崗岩，チャート，ホルンフェルス，大理石，砂岩ペグマタイトなどであり，その起源は基盤岩である。新期扇状地堆積物の礫もほぼこれに等しい岩体である。

また，諏訪・山崎および佐藤は，それぞれ敦煌周辺の地質を次のように報告している^{40,41)}。(a) 敦煌付近の最古期岩は下部原生界 (24~18 億年前) の敦煌群である。この時代の堆積層はほとんど変成岩に変わっている。(b) 敦煌北方と南方地域には古生層が広く発達しており，北方地域の古生層はバリスカン帯 (モンゴル地向斜) に属する。このモンゴル地向斜地域には古生代の初めに北方から海水が侵入し，厚い堆積層を沈積した。下部古生層は海成碎屑岩を主とし，炭酸塩岩や

火山岩などをはさんでいる所もある。南方地域の下部古生層は海成炭酸塩岩、碎屑岩を主としており、火山岩をはさんでいる。また、西方のタリム盆地の下部古生層には含燐炭質頁岩、ケイ質岩、石灰岩が見られる。(c) 敦煌北方の甘粛省の北山にはカレドニア造山期の深成岩類 (5.2~3.8 億年前) および花崗岩を主体とする 3 億年ほど前の深成岩が分布している。(d) 敦煌周辺の諸盆地では古生代以降、種々の堆積作用が進行した。

3-2. SO_4^{2-} の起源

SO_4^{2-} の起源を推定する有力な手段の 1 つは、 SO_4^{2-} 中の硫黄の安定同位体比、 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ を定量することである。硫黄化合物は図-1 に示すように、その供給源により特有の硫黄安定同位体比 ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) を持っているからである^{29,38,43,45-50}。しかし、現時点では $\delta^{34}\text{S}$ の値のみからその起源を結論づけることはできず、補助的手段として考えている。

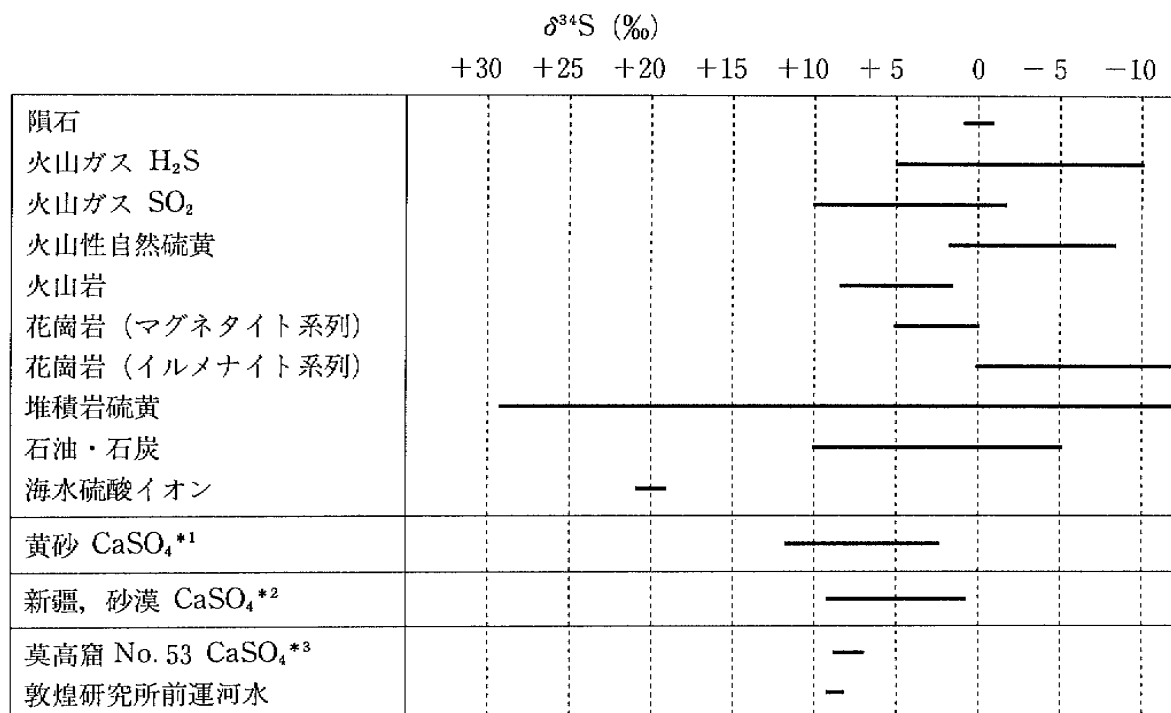
理化学研究所の岡田・矢吹は、1990 年 10 月中国新疆地域のタリム盆地、ジュンガル盆地およびトルファン盆地の砂漠縁辺地域で採取した CaSO_4 析出塩の $\delta^{34}\text{S}$ を測定し、新疆地方で $\delta^{34}\text{S}$ の値に明確な地域差のあることを報告している²⁹ (表-9, 図-1)。

なお、

$$\delta^{34}\text{S} \text{ (または } \delta^{18}\text{O}) = \frac{(\text{R}) \text{ 試料} - (\text{R}) \text{ 標準物質}}{(\text{R}) \text{ 標準物質}} \times 1000$$

ただし、 $\text{R} = ^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ または $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ である。

日本では中国から飛来する黄砂の組成と黄砂中の S の $\delta^{34}\text{S}$ 値、黄砂の水に可溶な化学成分、黄砂降下時と降下しない平常時の降水の化学組成と SO_4^{2-} 中の $\delta^{34}\text{S}$ 値などが活発に分析されており、黄砂中の SO_4 や黄砂降下時の降水中の SO_4^{2-} の起源が論議されている^{29,44,45,48,49,53-56}。日本で採取した黄砂中の SO_4^{2-} の、上田・坂本による $\delta^{34}\text{S}$ の分析値を図-1 に示す⁴⁹。



* 1 日本に飛来した黄砂の $\delta^{34}\text{S}$ (上田・坂本, 1989)

* 2 岡田・矢吹 (1991)

* 3 No. 53 窟内の壁上の $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の $\delta^{34}\text{S}$

図-1 天然の硫黄同位体組成 ($\delta^{34}\text{S}$) と敦煌周辺の天然水と CaSO_4 析出物の $\delta^{34}\text{S}$

表—9 新疆 (Xinjiang) の砂漠周辺地域の硫酸塩の硫黄同位体組成
(岡田・矢吹, 1991)

場 所	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)
Turpan Basin (吐魯番盆地)	
Heyanshan Qianshadi	+5.92 - 7.29
Aidinhui	+6.02
Zhunger Basin (准噶尔盆地)	
Liuhedi	+1.64 ~ 2.12
Daquanguo	+2.69
Tarim Basin (塔里木盆地南縁地域)	
Qira, west area, 28m sand dune	+9.21
Wadi between Hotan and Qira	+8.83
Riverside of Qira River	+7.51
A small fan at Pishan	+8.37

日本に飛来する黄砂に含まれる SO_4^{2-} の起源について、田中ら^{54,55)}は中国の砂漠土壌、日本の土壌と日本に飛来した黄砂の化学組成との比較、黄砂での硫黄含有量の粒度分布とさらに SO_2 の粒子への付着量を検討し、黄砂への SO_2 の吸着について検討した。その結果、日本に飛来する黄砂中の SO_4^{2-} の起源は化石燃料燃焼によって大気中に放出される SO_x によるものとは考えられず、黄砂が元来含んでいる CaSO_4 が主たる起源物質であると結論づけている。

日本における黄砂降下時の雨や雪の SO_4^{2-} が、中国から輸送される石炭などの化石燃料から放出される SO_2 に影響されることは理解できる^{38,45,53)}。日本に飛来した黄砂の水溶性成分から黄砂に含まれる CaCO_3 や CaSO_4 について論じた論文は多い。ここでは、黄砂中の SO_4^{2-} の $\delta^{34}\text{S}$ に注目してさらに論述する。上田・坂本⁴⁹⁾は、1988 年、日本の屋久島、福江、長崎、金沢および輪島に飛来した黄砂中の SO_4^{2-} 含有量と $\delta^{34}\text{S}$ の測定値に基づいた頻度分布を報告した(図-2)。 $\delta^{34}\text{S}$ の値から黄砂中の SO_4^{2-} は石油・石炭燃焼に由来する可能性が大きいようだと言っているが、しかしなおその結論には検討を要すると書いている。

北村ら⁴⁵⁾は、 $\delta^{34}\text{S}$ からみた石川県の降水中の SO_4^{2-} の起源の推定を行っている。金沢の雨水中の SO_4^{2-} を海水起源と非海水起源の2群にわけて、それぞれの濃度と $\delta^{34}\text{S}$ の値を報告している(表-10)。彼らの結論は以下の通りである。(a) 金沢の降水中の SO_4^{2-} の $\delta^{34}\text{S}$ は平均 +6.3 ‰ (+0.9 ~ +14.7) であった。(b) 金沢における1ヵ月ごとの $\delta^{34}\text{S}$ 値は +1 ~ +13 ‰ の広がりを出す。(c) 金沢における $\delta^{34}\text{S}$ の季節変動は冬に大きく夏に小さい傾向を示す。(d) $\delta^{34}\text{S}$ 値の大きいのは、中国の揚子江以北の中国北部の $\delta^{34}\text{S}$ 値の高い石炭の燃焼による可能性が強い。

金森ら⁵³⁾は、日本各地に飛来した黄砂の化学組成を、粒径別に分別して報告している。彼らは黄砂の源となる中国各地の土壌の化学組成を整理して報告しているので、参考までに表-11 にその値を転載しておく。飛来した黄砂の化学分析結果を通し、黄砂中の SO_4^{2-} の起源は、 SO_2 が黄砂エアロゾル粒子表面における反応でとりかこまれたのではないかと述べている。Winchester と Wang⁵⁶⁾は、バルク試料のイオンバランスに基づく統計的解析から、 SO_2 ガスあるいは H_2SO_4 ミストの反応で黄砂中の SO_4^{2-} 含有量は大きくなったと推論している。

以上のような研究成果をふまえ、我々は敦煌保護研究所前の運河水中の SO_4^{2-} と莫高窟 53 窟の洞窟内の岩石壁から 1991 年 5 月に採集した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に対して、 $\delta^{34}\text{S}$ および $\delta^{18}\text{O}$ を測定した

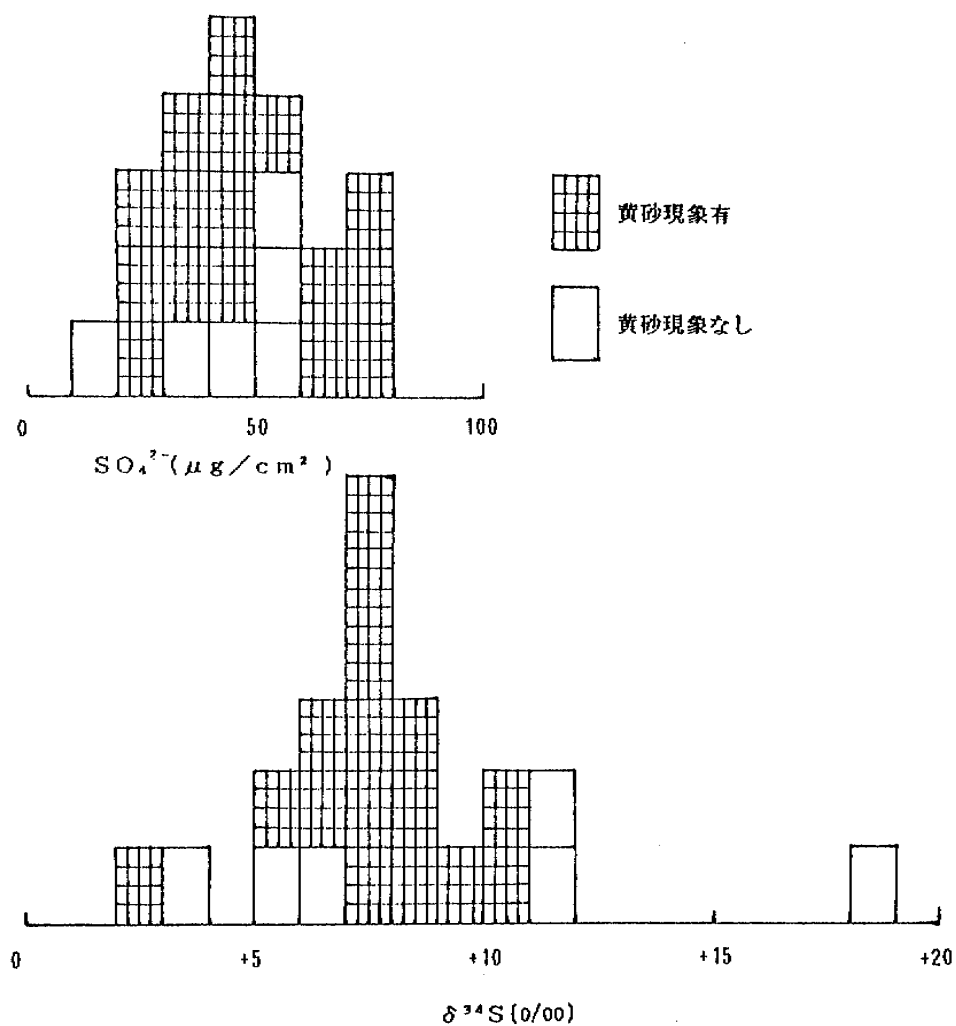


図-2 黄砂中の SO_4^{2-} 濃度と $\delta^{34}\text{S}$ の頻度分布 (上田・坂本, 1989)

表-10 金沢の雨水中の SO_4^{2-} の $\delta^{34}\text{S}$ (‰) (北村ら, 1993)

	時 期	試料数	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)		
			範 囲	平均値	標準偏差
硫酸イオン 全体	春 (3月-5月)	18	+2.3~+ 8.3	+4.3	±1.28
	夏 (6月-8月)	15	+1.2~+ 3.6	+2.3	±0.81
	秋 (9月-11月)	15	+2.6~+11.7	+7.2	±2.92
	冬 (12月-2月)	47	+0.9~+14.7	+8.9	±2.85
	年 間	95	+0.9~+14.7	+6.3	±3.51
非海水 起源の 硫酸イオン	春 (3月-5月)	18	-0.3~+ 3.5	+1.3	±0.88
	夏 (6月-8月)	15	-0.9~+ 1.7	+0.8	±0.69
	秋 (9月-11月)	15	-1.5~+ 3.9	+2.0	±1.52
	冬 (12月-2月)	47	-1.3~+ 7.3	+2.7	±1.22
	年 間	95	-1.5~+ 7.3	+1.8	±1.38

表-11 黄砂の源となる中国土壌の化学組成 (%) (金森ら, 1991)

	タクラマカン砂漠→ゴビ砂漠						内モンゴル			黄土地域			
	葉城	和田	布隆吉	鳴砂山	民豊	包頭	満洲里	馬蘭	離石	甘肅	太原(1)	洛川	太原(2)
Si	—	—	24.50	32.80	30.60	—	24.48	27.51	28.06	22.72	28.62	—	—
Na	1.74	1.65	—	—	—	2.13	1.95	1.33	1.11	1.34	1.22	1.17	1.24
K	2.20	1.87	1.57	1.43	2.13	1.87	2.03	2.12	2.16	1.80	1.74	1.97	1.96
Ca	6.32	6.57	5.74	4.29	6.80	2.82	0.50*	6.98	4.37	4.26	3.83	5.08	4.82
Mg	1.47	1.32	—	—	—	0.93	0.90	1.47	1.34	0.80	0.69	1.12	1.18
Al	5.34	5.00	6.66	6.70	7.06	6.00	8.17	5.06	6.32	6.06	6.01	6.04	5.34
Fe	2.33	2.08	2.68	1.21	2.57	3.01	3.80	3.89	3.78	2.83	3.38	2.90	2.51
Ti	0.23	0.27	—	—	—	0.37	0.34	0.34	0.42	0.36	0.42	0.33	0.27
Mn	0.054	0.054	—	—	—	0.055	0.11	0.12	—	—	—	0.065	0.054

* 水に洗われてCaCO₃が溶出したと思われる。

表-12 敦煌研究所前の運河の水のSO₄²⁻と莫高窟 No. 53 内の壁にみられる CaSO₄・2H₂O中のδ³⁴Sおよびδ¹⁸O

試料	測定値		(備考): 白色の析出物の鉱物同定
	δ ³⁴ S	δ ¹⁸ O	
53-A (CaSO ₄ ・2H ₂ O)	7.0	8.0	石英 SiO ₂ (大量), CaSO ₄ ・2H ₂ O (かなりの量), calcite CaCO ₃ (明らかに存在)
53-D (")	8.3	10.1	石英 SiO ₂ (大量), CaSO ₄ ・2H ₂ O (まあまあの量), calcite CaCO ₃ (可能性大)
保護研究所前の運河の水 (SO ₄ ²⁻)	9.2	8.4	

(表-12, 図-1)。析出塩試料のX線回折による鉱物同定結果をも表-12に示す。なお、水溶液からCaSO₄が析出するときには、(³⁴S/³²S)CaSO₄/(³⁴S/³²S)_{母液}の値は温度によって違ってくるが、常に1より大きくなり、母液中のδ³⁴Sの値は減少することを付記しておく^{51,52)}。

敦煌周辺の天然水のSO₄²⁻の起源については、いろいろ考えられる。確かに現在の大気汚染は、化石燃料から排出されるSO_x, NO_xなどで進行してきており、降水や降下物中のSO₄²⁻やNO₃⁻濃度は大きくなってきている。海洋から放出するジメチル硫黄も降水中のSO₄²⁻源として考慮されなければならない³⁹⁾。敦煌周辺の天然水では、表-2にみられるように陰イオン中でSO₄²⁻は50%

(当量比)をも占めているが、一般河川水の値からみて(表-3, 4), 化石燃料に由来するSO_xからのSO₄²⁻供給だけで敦煌周辺の降水中の大きな濃度を説明することはできない。前述したように敦煌周辺の降水量は年間約30mmほどであり、降水を通しての寄与は小さい。現時点では硫黄の起源を推定できる状態には至っていない。しかし、天然水中へのSO₄²⁻の供給は、岩石の化学的風化に基本的に関わっている可能性が強いと現在のところ考え、北野が日本の各河川流域についてかつて行った次の研究法を敦煌周辺の陸水に適用することを計画している^{11-13,21-23)}。(a) まず、河川水の化学組成のうち、岩石から溶出した部分を推定。(b) 次にそれらの化学成分が岩石から溶出する化学式、すなわち岩石を構成する鉱物からCO₂, H₂SO₄によって溶け出る化学過程を推定。(c) そこで、(a)で推定した1年間に或る流域で岩石から溶出した各化学成分の量を(b)

の式に入れて解く。そうすると、1年間にどういう鉱物がどれだけ化学的風化または溶解して、どういう鉱物（粘土鉱物など）がどれだけ生産されるか推定されることになる。そのためには、敦煌周辺の陸水が関係する地域の地質調査、析出塩類の種類と量、および降水物や降水の調査・測定などが必要であり、困難な仕事である。しかし、これらの検討を通して SO_4^{2-} の起源を含め、敦煌周辺の陸水の化学組成の形成機構を明らかにしていきたい。

4. 中国砂漠地域の析出塩について

砂漠地域では陸水の蒸発によって種々の塩類が析出するので、ここで中国砂漠地域の析出塩を整理する。

郭志清⁵⁷⁾により、中国の砂漠地域の砂に含まれている水に可溶性化学成分の分析が精力的に行われている。ただし、水に可溶性化学成分の鉱物像は X 線回折による同定がなされていないので、ここではただ Na_2CO_3 、 $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ 、 CaCO_3 、 CaSO_4 、 MgSO_4 、 NaCl などの化合物形が推定できるだけで、真の存在状態を示すわけではないことを予めことわっておく。例えば水に溶出する Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- の量が多い場合には、溶出する物質として $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ (calcite 形の CaCO_3 と MgCO_3 の固溶体) という表現をしている。 Ca^{2+} や Mg^{2+} が水に溶出する場合は少なくとも水に不溶性の dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) からではなく、 CaCO_3 と MgCO_3 である場合もあるかもしれないが、一般的には magnesian calcite ($(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$ (固溶体) からであると考えられる^{13,42,59-62)} のである。

以上の考えに沿って、郭志清の報告した水溶性成分の量から析出塩の化学物質を推定した結果を、中国各地の流動砂丘、半固定砂丘、固定砂丘 2、また不同地区流動砂丘、不同地区半固定砂丘、および不同地区固定砂丘についてそれぞれ表-13, 14, 15, 16, 17, および表-18 (12 ページ~21 ページ) に示す。

砂漠地域では gaylussite ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、nahcolite (NaHCO_3)、trona ($\text{NaCO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) などが層で見出されている⁵¹⁾、後述するように MgSO_4 にも CaSO_4 にも結晶水がついていることもわかっている²⁹⁾。岡田・矢吹は、中国の新疆、トルファン盆地の桃児溝や紅旗郷地域の砂漠砂の水溶性成分の分析と X 線回折による析出塩の鉱物同定を行い、次のように報告している。トルファン盆地の火焰山水系では古い時代に析出した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ や NaCl の層がみられる。桃児溝地域では、表面下 10~20 cm ほどまでに NaCl がみられ、40~60 cm の層には次のような Mg の塩の析出がみられた。すなわち、hexahydrite ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、pentahydrite ($\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)、starkeyite ($\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、kieserite ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) である。gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) もみられた。紅旗郷の析出塩は主として thernardite (NaSO_4) からできているが、少量ではあるが大変珍しい白色、繊維状の eugsterite ($\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) も見出された。

敦煌莫高窟付近の析出物については、朽津・段の報告があり^{1,2)} (表-1)、また今回新たに加えたデータは表-12 に示した通りである。結果を簡単にまとめて記すと、 NaCl および $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の析出が壁画を破損している。いずれも水溶液からの析出塩である。一般的な陸水から NaCl が析出したあとの溶液には Mg^{2+} と Cl^- が、そして敦煌周辺の陸水では更に SO_4^{2-} が、また $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が析出したあとの溶液には、 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、そして SO_4^{2-} などが多量溶存しているはずである。しかし、莫高窟で NaCl または $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が析出したあと、壁画の表面に上述のような Mg 塩などが析出した形跡は見られない。この理由は、 NaCl については、その起源溶液が既に析出していた NaCl の溶けた溶液であるためと考えられる²⁾。また $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ については、起源溶液と推定される洪水時の侵入水が²⁾、溶解度の高い Mg 分などを溶存したまま洞窟

表一13 中国各地の砂漠にみられる水溶性蒸発析出物質
—流動沙丘における水溶性化学成分の分析—

地区	試料採集地点	採集深度 (cm)	水可溶性塩量 (%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*						meq./100 g		anion; eq. %			meq./100 g		cation; eq. %		化学物質 (存在状態は考慮されない)
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σcation	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺	
東部	内蒙古毛烏素沙地	0- 10	0.024	0	0.22	0.08	0.05	0.16	0.09	0.10	0.35	62.9	22.9	14.3	0.35	45.7	25.7	28.6	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		20- 40	0.023	0	0.19	0.08	0.04	0.14	0.09	0.08	0.31	61.3	25.8	12.9	0.31	45.2	29.0	25.8	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		80-100	0.026	0	0.21	0.08	0.09	0.12	0.11	0.15	0.38	55.3	21.1	23.7	0.38	31.6	28.9	39.5	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄
		130-150	0.028	0	0.21	0.10	0.09	0.16	0.12	0.12	0.40	52.5	25.0	22.5	0.40	40.0	30.0	30.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄
地区	内蒙古科尔沁沙地	0- 32	0.034	0.05	0.29	0.08	0.04	0.16	0.22	0.08	0.46	73.9	17.4	8.7	0.46	34.8	47.8	17.4	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, MgSO ₄
		32- 67	0.026	0	0.27	0.05	0.02	0.12	0.13	0.09	0.34	79.4	14.7	5.9	0.34	35.3	38.2	26.5	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, MgSO ₄
		67-100	0.023	0	0.21	0.05	0.04	0.10	0.13	0.07	0.30	70.0	16.7	13.3	0.30	33.3	43.3	23.3	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
		0- 10	0.040	0	0.35	0.15	0.20	0.26	0.11	0.33	0.70	50.0	21.4	28.6	0.70	37.1	15.7	47.1	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl
中部	宁夏河東沙地	10- 20	0.038	0	0.35	0.06	0.07	0.24	0.09	0.15	0.48	72.9	12.5	14.6	0.48	50.0	18.8	31.3	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl
		20- 40	0.042	0	0.35	0.06	0.08	0.20	0.11	0.18	0.49	71.4	12.2	16.3	0.49	40.8	22.4	36.7	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl
		40- 60	0.064	0	0.30	0.04	0.12	0.27	0.05	0.14	0.46	65.2	8.7	26.1	0.46	58.7	10.9	30.4	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl
		60-100	0.048	0	0.35	0.08	0.11	0.28	0.06	0.20	0.54	64.8	14.8	20.4	0.54	51.9	11.1	37.0	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl
		100-150	0.036	0	0.31	0.04	0.04	0.27	0.13	迹	0.39	79.5	10.3	10.3	0.40	69.2	33.3	—	(Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , CaCl ₂
		150-200	0.054	0	0.42	0.08	0.08	0.28	0.13	0.17	0.58	72.4	13.8	13.8	0.58	48.3	22.4	29.3	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
		200-250	0.048	0	0.39	0.13	0.03	0.28	0.05	0.22	0.55	70.9	23.6	5.5	0.55	50.9	9.1	40.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
		0- 5	0.113	0	0.56	0.12	0.86	0.25	0.14	1.15	1.54	36.4	7.8	55.8	1.54	16.2	9.1	74.7	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl
地区	宁夏騰格里沙漠東南縁	5- 10	0.083	0	0.56	0.06	0.54	0.18	0.08	0.90	1.16	48.3	5.2	46.6	1.16	15.5	6.9	77.6	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃
		10- 20	0.110	0	0.49	0.06	0.94	0.19	0.09	1.21	1.49	32.9	4.0	63.1	1.49	12.8	6.0	81.2	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃
		20- 50	0.107	0	0.67	0.06	0.70	0.23	0.19	1.01	1.43	46.9	4.2	49.0	1.43	16.1	13.3	70.6	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃
		50-100	0.112	0	0.63	0.06	0.80	0.25	0.08	1.16	1.49	42.3	4.0	53.7	1.50	16.8	5.4	77.9	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃
		100-150	0.091	0	0.55	0.06	0.61	0.19	0.09	0.94	1.22	45.1	4.9	50.0	1.21	15.6	7.4	77.0	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃
		150-250	0.085	0	0.58	0.08	0.46	0.20	0.08	0.84	1.12	51.8	7.1	41.1	1.13	17.9	7.1	75.0	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl

表—13 (続き)

地区	試料採取地点	採取深度 (cm)	水溶性 塩量(%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*						meq./100 g		anion; eq. %			cation; eq. %			化学物質
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺	
西部	新疆准噶尔	0-50	0.031	0.038	0.21	0.08	0.13	0.18	0.23	0.048	0.46	54.1	17.5	28.4	39.3	50.2	10.5	(Ca, Mg)CO ₃ , MgSO ₄ , NaCl, MgCl ₂
	盆地沙漠	50-100	0.031	0.038	0.13	0.14	0.20	0.20	0.30	0.008	0.51	33.1	27.6	39.4	39.4	59.1	1.6	(Ca, Mg)CO ₃ , MgSO ₄ , MgCl ₂ , CaSO ₄
		0-20	0.098	0	0.80	0.56	迹	0.50	0.16	0.70	1.36	58.8	41.2	—	1.36	11.8	51.5	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl
	甘肃河西走	20-40	0.137	0	0.61	1.63	迹	0.50	0.25	1.49	2.24	27.2	72.8	—	2.24	11.2	66.5	NaCl, (Ca, Mg)CO ₃
	廊沙漠	40-70	0.133	0	0.53	1.60	迹	0.40	0.57	1.16	2.13	24.9	75.1	—	2.13	18.8	54.4	NaCl, (Ca, Mg)CO ₃ , MgCl ₂
地区		70-100	0.073	0	0.33	0.56	迹	0.65	0.16	0.08	0.89	37.1	62.9	—	0.89	18.0	9.0	CaCl ₂ , (Ca, Mg)CO ₃ , NaCl
		0-24	0.220	0	0.61	2.97	0.54	0.31	0.23	3.58	4.12	14.8	72.1	13.1	4.12	5.6	86.9	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃
		24-46	0.820	0	0.63	10.79	1.55	0.37	0.22	12.38	12.97	4.9	83.2	12.0	12.97	1.7	95.5	NaCl, Na ₂ SO ₄
	青海柴達木	46-66	0.400	0	0.56	3.37	1.11	0.46	0.31	4.27	5.04	11.1	66.9	22.0	5.04	6.2	84.7	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃
	盆地沙漠	66-86	0.400	0	0.63	3.97	1.46	0.31	0.31	5.44	6.06	10.4	65.5	24.1	6.06	5.1	89.8	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃
		86-106	0.290	0	0.55	2.93	2.01	0.31	0.56	4.62	5.49	10.0	53.3	36.6	5.49	10.2	84.2	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃
		106-126	0.380	0	0.63	2.89	0.34	0.34	0.28	3.24	3.86	16.3	74.9	8.8	3.86	8.8	83.9	NaCl, (Ca, Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
		126-146	0.320	0	0.55	3.78	1.49	0.34	0.21	5.27	5.82	9.5	64.9	25.6	5.82	3.6	90.5	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃
		146-166	0.380	0	0.58	3.17	1.59	0.31	0.64	4.39	5.34	10.9	59.4	29.8	5.34	12.0	82.2	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃ , MgSO ₄
		166-186	0.430	0	0.56	5.45	2.63	0.31	0.43	7.90	8.64	6.5	63.1	30.4	8.64	3.6	91.4	NaCl, Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃
* 郭時清 (1987)		186-196	0.430	0	0.54	3.96	1.22	0.37	0.31	5.04	5.72	9.4	69.2	21.3	5.72	5.4	88.1	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃

表-14 中国各地の砂漠にみられる水溶性蒸発析出物質
—半固定沙丘における水溶性化学成分の分析—

地区	試料採集地点	採集深度 (cm)	水可溶性 塩量 (%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*						meq./100 g Σanion	anion; eq. %			meq./100 g Σcation	cation; eq. %		化学物質		
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺		Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺		Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺
東 部 地 区	内蒙古毛烏素沙地	0- 3	0.037	0	0.34	0.12	0.04	0.30	0.08	0.12	0.50	68.0	24.0	8.0	0.50	60.0	16.0	24.0	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		5- 15	0.042	0	0.26	0.25	0.09	0.28	0.07	0.24	0.60	43.3	41.7	15.0	0.60	48.3	11.7	40.0	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		25- 35	0.032	0	0.26	0.11	0.06	0.28	0.08	0.07	0.43	60.5	25.6	14.0	0.43	65.1	18.6	16.3	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		55- 65	0.027	0	0.25	0.10	0.05	0.20	0.06	0.14	0.40	62.5	25.0	12.5	0.40	50.0	15.0	35.0	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
		140-150	0.034	0	0.25	0.11	0.10	0.19	0.07	0.20	0.46	54.3	23.9	21.7	0.46	41.3	15.2	43.5	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
		0- 17	0.038	0	0.16	0.20	0.08	0.13	0.07	0.25	0.45	35.6	44.4	20.0	0.45	28.9	15.6	55.6	NaCl, (Ca, Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
中 部 地 区	寧夏河東沙地	17-100	0.028	0	0.18	0.18	0.05	0.06	0.08	0.26	0.41	43.9	43.9	12.2	0.41	14.6	22.0	63.4	NaCl, (Ca, Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , MgSO ₄
		0- 10	0.062	0	0.55	0.19	0.37	0.56	0.07	0.48	1.11	49.5	17.1	33.3	1.11	50.5	6.3	43.2	(Ca, Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, CaSO ₄
		10- 20	0.058	0	0.57	0.13	0.17	0.55	0.07	0.25	0.87	65.5	14.9	19.5	0.92	63.2	8.0	28.7	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , Na ₂ SO ₄
		20- 40	0.055	0	0.52	0.11	0.03	0.53	0.02	0.11	0.66	78.8	16.7	4.5	0.66	80.3	3.0	16.7	CaCO ₃ , NaCl
		40- 60	0.060	0	0.59	0.08	0.03	0.58	0.05	0.07	0.70	84.3	11.4	4.3	0.70	82.9	7.1	10.0	CaCO ₃ , NaCl
		60- 80	0.064	0	0.60	0.11	0.09	0.52	0.08	0.20	0.80	75.0	13.8	11.3	0.80	65.0	10.0	25.0	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
西 部 地 区	寧夏騰格里沙漠東南緣	120-130	0.056	0	0.56	0.11	0.09	0.55	0.06	0.15	0.76	73.7	14.5	11.8	0.76	72.4	7.9	19.7	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
		150-160	0.060	0	0.55	0.11	0.07	0.58	0.06	0.08	0.73	75.3	15.1	9.6	0.73	79.5	8.2	12.3	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		170-180	0.058	0	0.51	0.11	0.16	0.58	0.07	0.13	0.78	65.4	14.1	20.5	0.78	74.4	9.0	16.7	(Ca, Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , NaCl
		220-230	0.066	0	0.51	0.17	0.12	0.57	0.07	0.16	0.80	63.8	21.3	15.0	0.80	71.3	8.8	20.0	(Ca, Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		0- 10	0.146	0	0.97	0.18	0.80	0.38	0.09	1.48	1.95	49.7	9.2	41.0	1.95	19.5	4.6	75.9	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , CaCO ₃ , NaCl
		10- 20	0.123	0	0.88	0.12	0.64	0.42	0.17	1.05	1.64	53.7	7.3	39.0	1.64	25.6	10.4	64.0	Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃ , Na ₂ CO ₃ , NaCl
西 部 地 区	沙漠東南緣	20- 30	0.125	0	0.90	0.11	0.70	0.28	0.23	1.20	1.71	52.6	6.4	40.9	1.71	16.4	13.5	70.1	Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃ , Na ₂ CO ₃ , NaCl
		30- 50	0.122	0	0.92	0.06	0.79	0.37	0.19	1.21	1.77	52.0	3.4	44.6	1.77	20.9	10.7	68.4	Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃ , Na ₂ CO ₃

表-14 (続き)

地区	試料採集地点	採集深度 (cm)	水可溶性 塩量 (%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*							meq./100 g		anion; eq. %			meq./100 g		cation; eq. %		化学物質
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σcation	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺		
中部地区	宁夏腾格里 沙漠東南縁	50-100	0.133	0	0.81	0.06	0.76	0.35	0.23	1.05	1.63	49.7	3.7	46.6	1.63	21.5	14.1	64.4	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ CO ₃	
		100-150	0.111	0	0.70	0.12	0.33	0.27	0.06	0.82	1.15	60.9	10.4	28.7	1.15	23.5	5.2	71.3	Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl	
		150-250	0.104	0	0.77	0.12	0.16	0.27	0.08	0.70	1.05	73.3	11.4	15.2	1.05	25.7	7.6	66.7	Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl	
		結皮	0.081	0	0.72	0.14	0.20	0.25	0.25	0.56	1.06	67.9	13.2	18.9	1.06	23.6	23.6	52.8	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, MgSO ₄	
	新疆准噶尔 盆地沙漠	0- 19	0.066	0	0.42	0.14	0.35	0.23	0.40	0.28	0.91	46.2	15.4	38.5	0.91	25.3	44.0	30.8	(Ca,Mg)CO ₃ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , NaCl	
		19- 39	0.065	0	0.52	0.14	0.20	0.45	0.25	0.16	0.86	60.5	16.3	23.2	0.86	52.3	29.1	18.6	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄	
		39-100	0.048	0	0.45	0.14	0.10	0.18	0.23	0.28	0.69	65.2	20.3	14.5	0.69	26.1	33.3	40.6	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃ , MgSO ₄	
		0- 3	0.239	0	0.64	0.87	1.98	1.45	0.32	1.72	3.49	18.3	24.9	56.7	3.49	41.5	9.2	49.3	Na ₂ SO ₄ , NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄	
西部地区	甘肃河西走 廊沙漠	3- 54	0.214	0	0.67	0.73	1.75	1.70	0.41	1.04	3.15	21.2	23.2	55.6	3.15	54.0	13.0	33.0	CaSO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄	
		54- 68	0.131	0	0.62	0.93	0.48	1.15	0.57	0.31	2.03	34.8	45.8	23.6	2.03	56.7	28.1	15.3	(Ca,Mg)CO ₃ , CaCl ₂ , NaCl, CaSO ₄	
		68-130	0.120	0	0.59	0.93	0.40	0.95	0.57	0.40	1.92	30.7	48.4	20.8	1.92	49.5	29.7	20.8	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , CaCl ₂	
		0- 15	0.866	0	0.64	12.18	1.57	2.13	0.65	11.61	14.39	4.4	84.6	10.9	14.39	14.8	4.5	80.7	NaCl, CaSO ₄	
	青海柴達木 盆地沙漠	15- 30	0.820	0	0.70	6.04	0.71	1.21	0.61	5.63	7.45	9.4	81.1	9.5	7.45	16.2	8.2	75.6	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , CaCl ₂	
		43- 55	1.300	0	0.65	10.40	3.71	1.79	1.25	11.72	14.76	4.4	70.5	25.1	14.76	12.1	8.5	79.4	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄	
		75- 85	1.000	0	0.69	9.11	1.96	1.48	0.96	9.32	11.76	5.9	77.5	16.7	11.76	12.6	8.2	79.3	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄	
		100-120	0.820	0	0.41	8.02	1.68	1.11	0.72	8.28	10.11	4.1	79.3	16.6	10.11	11.0	7.1	81.9	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄	
		120-150	1.320	0	0.42	11.68	1.37	0.87	1.35	11.25	13.47	3.1	86.7	10.2	13.47	6.5	10.0	83.5	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄	

* 郭時清 (1987)

表—15 中国各地の砂漠にみられる水溶性蒸発析出物質
— 固定沙丘における水溶性化学成分の分析 —

地区	試料採集地点	採集深度 (cm)	水可溶性 塩量 (%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*							meq./100 g Σanion	anion; eq. %			meq./100 g Σcation	cation; eq. %			化学物質
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻		Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺	
東 部 地 区	内蒙古毛烏素沙地	0- 22	0.044	0	0.32	0.23	0.09	0.36	0.10	0.18	0.64	50.0	35.9	14.1	0.64	56.3	15.6	28.1	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , CaCl ₂
		40- 50	0.041	0	0.37	0.11	0.09	0.36	0.09	0.12	0.57	64.9	19.3	15.8	0.57	63.2	15.8	21.1	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		80- 90	0.031	0	0.28	0.14	0.03	0.26	0.09	0.10	0.45	62.2	31.1	6.7	0.45	57.8	20.0	22.2	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaCl ₂ , CaSO ₄
		130-140	0.034	0	0.30	0.13	0.04	0.26	0.07	0.14	0.47	63.8	27.7	8.5	0.47	55.3	14.9	29.8	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		200-210	0.037	0	0.28	0.10	0.12	0.24	0.08	0.18	0.50	56.0	20.0	22.0	0.50	48.0	16.0	36.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄
		0- 16	0.032	0	0.18	0.22	0.07	0.14	0.06	0.27	0.47	38.3	46.8	14.9	0.47	29.8	12.8	57.4	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
中 部 地 区	内蒙古科尔沁沙地	16- 44	0.028	0	0.14	0.20	0.07	0.18	0.03	0.20	0.41	34.1	48.8	17.1	0.41	43.9	7.3	48.8	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄
		44-100	0.026	0	0.13	0.20	0.06	0.20	0.03	0.16	0.39	33.3	51.3	15.4	0.39	51.3	7.7	41.0	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , CaCl ₂
		0- 1	0.068	0	0.76	0.11	0.20	0.77	0.08	0.22	1.07	71.0	10.3	18.7	1.07	72.0	7.5	20.6	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, CaSO ₄
		1- 10	0.058	0	0.76	0.08	0.23	0.65	0.26	0.16	1.07	71.0	7.5	21.5	1.07	60.7	24.3	15.0	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ , NaCl
		10- 20	0.064	0	0.76	0.04	0.27	0.55	0.16	0.36	1.07	71.0	3.7	25.2	1.07	51.4	15.0	33.6	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
		20- 40	0.072	0	0.72	0.17	0.31	0.57	0.29	0.34	1.20	60.0	14.2	25.8	1.20	47.5	24.2	28.3	(Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , NaCl, Na ₂ SO ₄
中 部 地 区	宁夏河東沙地	40- 60	0.066	0	0.61	0.04	0.21	0.54	0.24	0.08	0.86	70.9	4.7	24.4	0.86	62.8	27.9	9.3	(Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄
		70- 80	0.060	0	0.68	0.17	0.41	0.55	0.13	0.58	1.26	54.0	13.5	32.5	1.26	43.7	10.3	46.0	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl
		120-130	0.064	0	0.61	0.15	0.23	0.68	0.24	0.07	0.99	61.6	15.2	23.2	0.99	68.7	24.2	7.1	(Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , NaCl, CaCl ₂
		170-180	0.070	0	0.66	0.35	0.28	0.71	0.17	0.41	1.29	51.2	27.1	21.7	1.29	55.0	13.2	31.8	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		220-230	0.070	0	0.69	0.25	0.20	0.67	0.23	0.24	1.14	60.5	21.9	17.5	1.14	58.8	20.2	21.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄
		0- 7	0.165	0	0.93	0.47	0.89	0.40	0.21	1.68	2.29	40.6	20.5	38.9	2.29	17.5	9.2	73.4	Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃
中 部 地 区	宁夏騰格里沙漠東南縁	7- 19	0.167	0	1.04	0.29	0.94	0.52	0.23	1.52	2.27	45.8	12.8	41.4	2.27	22.9	10.1	67.0	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
		19- 33	0.129	0	0.77	0.18	0.80	0.56	0.14	1.05	1.75	44.0	10.3	45.7	1.75	32.0	8.0	60.0	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl

表-15 (続き, その1)

地区	試料採取地点	採集深度 (cm)	水溶性塩量 (%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*						meq./100 g		anion; eq. %			meq./100 g		cation; eq. %		化学物質
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Σanion	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σcation	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺	
中部地区	宁夏腾格里沙漠東南縁	33-44	0.128	0	0.81	0.18	0.77	0.38	0.30	1.08	1.76	46.0	10.2	43.8	1.76	21.6	17.0	61.4	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
		44-60	0.150	0	0.76	0.29	0.95	0.37	0.11	1.52	2.00	38.0	14.5	47.5	2.00	18.5	5.5	76.0	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
		60-100	0.140	0	0.79	0.23	0.85	0.28	0.10	1.49	1.87	42.2	12.3	45.5	1.87	15.0	5.3	79.7	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl
		100-150	0.129	0	0.77	0.18	0.78	0.28	0.08	1.37	1.73	44.5	10.4	45.1	1.73	16.2	4.6	79.2	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl
		150-250	0.142	0	0.67	0.18	0.13	0.72	0.17	0.09	0.98	68.4	18.4	13.3	0.98	73.5	17.3	9.2	(Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , NaCl, CaCl ₂
西部地区	新疆准噶尔盆地沙漠	結皮	0.087	0.113	0.70	0.14	0.25	0.55	0.40	0.253	1.20	67.6	11.6	20.8	1.20	45.7	33.3	21.0	(Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄
		0-20	0.047	0.076	0.34	0.14	0.10	0.33	0.25	0.076	0.66	63.4	21.3	15.2	0.66	50.3	38.1	11.6	(Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , NaCl, CaCl ₂ , MgSO ₄
		20-43	0.074	0.038	0.34	0.14	0.60	0.20	0.10	0.818	1.12	33.8	12.5	53.7	1.12	17.9	8.9	73.2	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
		43-100	0.081	0.038	0.74	0.81	0.50	0.20	0.05	1.838	2.09	37.3	38.8	23.9	2.09	9.6	2.4	88.0	NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃
		0-10	0.311	1.13	1.97	1.26	0.25	0.34	0.34	3.93	4.61	67.2	27.3	5.4	4.61	7.4	7.4	85.2	Na ₂ CO ₃ , NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
	内蒙古烏蘭布和沙漠	20-30	0.153	0.87	0.91	0.60	0.04	0.53	0.41	1.48	2.42	73.6	24.8	1.7	2.42	21.9	16.9	61.2	Na ₂ CO ₃ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl
		40-50	0.146	0.21	0.68	0.86	0.41	0.61	0.15	1.40	2.16	41.2	39.8	19.0	2.16	28.2	6.9	64.8	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
		90-100	1.039	0	0.31	2.63	12.55	7.27	0.80	7.42	15.49	2.0	17.0	81.0	15.49	46.9	5.2	47.9	CaSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, MgSO ₄
		190-200	0.336	0	0.14	1.79	3.24	0.51	0.70	3.96	5.17	2.7	34.6	62.7	5.17	9.9	13.5	76.6	Na ₂ SO ₄ , NaCl, MgSO ₄ , CaSO ₄
		0-26	0.237	0.13	1.57	0.96	0.73	0.30	0.57	2.52	3.39	50.1	28.3	21.5	3.39	8.8	16.8	74.3	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , MgSO ₄
地区	甘肃河西走廊沙漠	26-47	0.165	0.10	1.12	0.70	0.46	0.30	0.57	1.51	2.38	51.3	29.4	19.3	2.38	12.6	23.9	63.4	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , MgSO ₄
		75-85	0.206	0	1.12	1.04	0.71	0.30	0.66	1.91	2.87	39.0	36.2	24.7	2.87	10.5	23.0	66.6	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , MgSO ₄
		85-90	0.147	0	0.93	0.31	0.77	0.25	0.50	1.26	2.01	46.3	15.4	38.3	2.01	12.4	24.9	62.7	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃ , MgSO ₄
		104-149	0.091	0	0.79	0.25	0.21	0.25	0.41	0.59	1.25	63.2	20.0	16.8	1.25	20.0	32.8	47.2	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , MgSO ₄
		149-215	0.136	0	1.05	0.39	0.46	0.30	0.57	1.03	1.90	55.3	20.5	24.2	1.90	15.8	30.0	54.2	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , MgSO ₄

表-15 (続き, その2)

地区	試料採集地点	採集深度 (cm)	水可溶性 塩量 (%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*							meq./100 g		anion; eq. %			cation; eq. %			化学物質
				CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Σanion	Σcation	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺	
西部 地区	青海柴達木 盆地沙漠	0-15	2.55	0	0.79	26.43	8.76	4.23	4.08	27.67	35.98	35.98	2.2	73.5	24.3	11.8	11.3	76.9	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄
		15-30	2.44	0	0.61	16.73	16.16	5.38	2.53	25.59	33.50	33.50	1.8	49.9	48.2	16.1	7.6	76.4	NaCl, Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ , MgSO ₄
		30-62	4.00	0	2.18	40.47	19.03	9.73	6.25	45.72	61.68	61.68	3.5	65.6	30.9	15.8	10.1	74.1	NaCl, Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ , MgSO ₄
		62-90	3.05	0	1.38	24.50	17.85	9.39	6.31	28.03	43.73	43.73	3.2	56.0	40.8	21.5	14.4	64.1	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
		90-109	3.78	0	2.25	13.86	19.13	10.60	11.28	13.36	35.24	35.24	6.4	39.3	54.3	30.1	32.0	37.9	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃
	新疆塔里木 盆地沙漠	109-140	2.28	0	1.54	11.88	23.96	11.22	8.59	17.57	37.38	37.38	4.1	31.8	64.1	30.0	23.0	47.0	CaSO ₄ , MgSO ₄ , NaCl, Na ₂ SO ₄
		140-150	2.80	0	0.72	12.08	24.87	14.34	6.33	17.00	37.67	37.67	1.9	32.1	66.0	38.1	16.8	45.1	CaSO ₄ , MgSO ₄ , NaCl, Na ₂ SO ₄
		0-42	0.405	0	2.13	3.52	0.42	1.80	0.74	3.53	6.07	6.07	35.1	58.0	6.9	29.7	12.2	58.2	NaCl, (Ca, Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄
		60-115	0.346	0	1.52	9.47	0.40	2.40	1.60	7.39	11.39	11.39	13.3	83.1	3.5	21.1	14.0	64.9	NaCl, CaCl ₂ , MgCl ₂ , (Ca, Mg)CO ₃
		135-168	0.440	0	0.87	5.69	4.78	1.90	1.06	8.38	11.34	11.34	7.7	50.2	42.2	16.8	9.3	73.9	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃
西部 地区	盆地沙漠	168-208	0.523	0	1.77	0.99	7.56	0.75	0.57	9.00	10.32	10.32	17.2	9.6	73.3	7.3	5.5	87.2	Na ₂ SO ₄ , (Ca, Mg)CO ₃ , NaCl
		208以下	1.159	0	0.59	0.87	14.44	5.65	1.80	8.45	15.90	15.90	3.7	5.5	90.8	35.5	11.3	53.1	Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ , MgSO ₄ , NaCl

* 郭時清 (1987)

表-16 中国不同地区の砂漠にみられる水溶性蒸発析出物質

—流動沙丘における水溶性化学成分の分析—

地区	採集深度 (cm)	水可溶性 塩量(%)	水溶性成分含有量 (meq/100 g)*						meq/100 g Σanion	anion; eq. %			meq/100 g Σcation	cation; eq. %			化学物質	
			CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺		Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺		ΣNa ⁺ +K ⁺
東 部 地 区	0- 5	0.029	0.02	0.26	0.08	0.05	0.16	0.09	0.16	0.41	68.3	19.5	12.2	0.41	39.0	22.0	39.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
	5-10	0.029	0.02	0.26	0.08	0.05	0.16	0.09	0.16	0.41	68.3	19.5	12.2	0.41	39.0	22.0	39.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
	10-20	0.028	0.02	0.26	0.08	0.05	0.16	0.09	0.16	0.41	68.3	19.5	12.2	0.41	39.0	22.0	39.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
	20-40	0.025	0.02	0.24	0.08	0.04	0.14	0.08	0.16	0.38	68.4	21.1	10.5	0.38	36.8	21.1	42.1	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
	40-60	0.026	—	0.24	0.06	0.05	0.13	0.09	0.13	0.35	68.6	17.1	14.3	0.35	37.1	25.7	37.1	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
	60-80	0.024	—	0.22	0.06	0.05	0.12	0.08	0.13	0.33	66.7	18.2	15.2	0.33	36.4	24.2	39.4	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
	80-100	0.025	—	0.22	0.04	0.07	0.11	0.08	0.14	0.33	66.7	12.1	21.2	0.33	33.3	24.2	42.4	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
	0- 5	0.076	—	0.46	0.14	0.53	0.26	0.13	0.74	1.13	40.7	12.4	46.9	1.13	23.0	11.5	65.5	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
中 部 地 区	5-10	0.062	—	0.46	0.11	0.37	0.22	0.10	0.62	0.94	48.9	11.7	39.4	0.94	23.4	10.6	66.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃
	10-20	0.074	—	0.42	0.06	0.51	0.22	0.09	0.68	0.99	42.4	6.1	51.5	0.99	22.2	9.1	68.7	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	20-40	0.075	—	0.51	0.06	0.39	0.22	0.15	0.59	0.96	53.1	6.3	40.6	0.96	22.9	15.6	61.5	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	40-60	0.090	—	0.48	0.05	0.44	0.26	0.10	0.61	0.97	49.5	5.2	45.4	0.97	26.8	10.3	62.9	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	60-80	0.080	—	0.49	0.07	0.46	0.27	0.07	0.68	1.02	48.0	6.9	45.1	1.02	26.5	6.9	66.7	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	80-100	0.080	—	0.49	0.07	0.46	0.27	0.07	0.68	1.02	48.0	6.9	45.1	1.02	26.5	6.9	66.7	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	0- 5	0.116	—	0.54	1.20	0.22	0.33	0.21	1.42	1.96	27.6	61.2	11.2	1.96	16.8	10.7	72.4	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
	5-10	0.116	—	0.54	1.20	0.22	0.33	0.21	1.42	1.96	27.6	61.2	11.2	1.96	16.8	10.7	72.4	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
西 部 地 区	10-20	0.116	—	0.54	1.20	0.22	0.33	0.21	1.42	1.96	27.6	61.2	11.2	1.96	16.8	10.7	72.4	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
	20-40	0.329	—	0.48	3.65	0.40	0.35	0.23	3.95	4.53	10.6	80.6	8.8	4.53	7.7	5.1	87.2	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
	40-60	0.188	—	0.43	2.44	0.40	0.37	0.36	2.54	3.27	13.1	74.6	12.2	3.27	11.3	11.0	77.7	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ , MgSO ₄
	60-80	0.178	—	0.40	1.44	0.52	0.33	0.33	1.70	2.36	16.9	61.0	22.0	2.36	14.0	14.0	72.0	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , MgSO ₄
	80-100	0.131	—	0.34	1.31	0.68	0.28	0.28	1.77	2.33	14.6	56.2	29.2	2.33	12.0	12.0	76.0	NaCl, Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄

* 郭時清 (1987)

表-17 中国不同地区の砂漠にみられる水溶性蒸発析出物質
—半固定沙丘における水溶性化学成分の分析—

地区	深度 (cm)	水可溶性 盐量(%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*						meq./100 g Σanion	anion; eq. %			meq./100 g Σcation	cation; eq. %			化学物质	
			CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺		Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻		SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺		ΣNa ⁺ +K ⁺
東 部 地 区	0- 5	0.038	—	0.25	0.16	0.07	0.22	0.08	0.18	0.48	52.1	33.3	14.6	0.48	45.8	16.7	37.5	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
	5- 10	0.040	—	0.21	0.22	0.09	0.21	0.07	0.24	0.52	40.4	42.3	17.3	0.52	40.4	13.5	46.2	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
	10- 20	0.038	—	0.22	0.22	0.08	0.19	0.08	0.25	0.52	42.3	42.3	15.4	0.52	36.5	15.4	48.1	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
	20- 40	0.040	—	0.22	0.17	0.06	0.14	0.08	0.23	0.45	48.9	37.8	13.3	0.45	31.1	17.8	51.1	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
	40- 60	0.028	—	0.22	0.14	0.05	0.15	0.08	0.18	0.41	53.7	34.1	12.2	0.41	36.6	19.5	43.9	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
	60- 80	0.028	—	0.21	0.15	0.06	0.13	0.08	0.21	0.42	50.0	35.7	14.3	0.42	31.0	19.0	50.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
中 部 地 区	80-100	0.028	—	0.21	0.15	0.08	0.13	0.08	0.23	0.44	47.7	34.1	18.2	0.44	29.5	18.2	52.3	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ SO ₄
	0- 5	0.104	—	0.75	0.19	0.59	0.47	0.08	0.98	1.53	49.0	12.4	38.6	1.53	30.7	5.2	64.1	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	5- 10	0.104	—	0.75	0.19	0.59	0.47	0.08	0.98	1.53	49.0	12.4	38.6	1.53	30.7	5.2	64.1	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	10- 20	0.091	—	0.72	0.13	0.41	0.49	0.12	0.65	1.26	57.1	10.3	32.5	1.26	38.9	9.5	51.6	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	20- 40	0.090	—	0.72	0.10	0.39	0.43	0.12	0.66	1.21	59.5	8.3	32.2	1.21	35.5	9.9	54.5	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , NaCl
	40- 60	0.090	—	0.73	0.07	0.40	0.47	0.13	0.60	1.20	60.8	5.8	33.3	1.20	39.2	10.8	50.0	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , NaCl
西 部 地 区	60- 80	0.099	—	0.71	0.08	0.43	0.44	0.15	0.63	1.22	58.2	6.6	35.2	1.22	36.1	12.3	51.6	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , NaCl
	80-100	0.090	—	0.71	0.08	0.43	0.44	0.15	0.63	1.22	58.2	6.6	35.2	1.22	36.1	12.3	51.6	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , Na ₂ CO ₃ , NaCl
	0- 5	0.390	—	0.59	4.38	1.26	1.30	0.46	4.47	6.23	9.5	70.3	20.2	6.23	20.9	7.4	71.7	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄
	5- 10	0.387	—	0.58	4.35	1.22	1.35	0.49	4.31	6.15	9.4	70.7	19.8	6.15	22.0	8.0	70.0	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃
	10- 20	0.379	—	0.59	2.99	1.25	1.20	0.48	3.15	4.83	12.2	61.9	25.9	4.83	24.8	9.9	65.2	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄
	20- 40	0.366	—	0.62	3.03	1.55	1.22	0.53	3.45	5.20	11.9	58.3	29.8	5.20	23.5	10.2	66.3	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄
* 郭時清 (1987)	40- 60	0.512	—	0.59	3.67	1.21	1.14	0.62	3.71	5.47	10.8	67.1	22.1	5.47	20.8	11.3	67.8	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃
	60- 80	0.412	—	0.58	3.39	0.83	0.76	0.59	3.45	4.80	12.1	70.6	17.3	4.80	15.8	12.3	71.9	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄
	80-100	0.391	—	0.58	3.39	0.82	0.87	0.59	3.33	4.79	12.1	70.8	17.1	4.79	18.2	12.3	69.5	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄

* 郭時清 (1987)

表—18 中国不同地区の砂漠にみられる水溶性蒸発析出物質
—固定沙丘における水溶性化学成分の分析—

地区	深 度 (cm)	水可溶性 塩量(%)	水溶性成分含有量 (meq./100 g)*							meq./100 g Σanion	anion; eq. %			meq./100 g Σcation	cation; eq. %			化学物質
			CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺		HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻		Ca ²⁺	Mg ²⁺	ΣNa ⁺ +K ⁺	
東 部 地 区	0- 5	0.038	—	0.25	0.23	0.08	0.25	0.08	0.23	0.56	44.6	41.1	14.3	0.56	44.6	14.3	41.1	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄
	5- 10	0.038	—	0.25	0.23	0.08	0.25	0.08	0.23	0.56	44.6	41.1	14.3	0.56	44.6	14.3	41.1	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄
	10- 20	0.037	—	0.24	0.22	0.08	0.26	0.08	0.20	0.54	44.4	40.7	14.8	0.54	48.1	14.8	37.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄
	20- 40	0.036	—	0.25	0.19	0.08	0.27	0.07	0.18	0.52	48.1	36.5	15.4	0.52	51.9	13.5	34.6	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄
	40- 60	0.034	—	0.25	0.16	0.08	0.28	0.06	0.15	0.49	51.0	32.7	16.3	0.49	57.1	12.2	30.6	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄
	60- 80	0.031	—	0.24	0.16	0.06	0.26	0.06	0.14	0.46	52.2	34.8	13.0	0.46	56.5	13.0	30.4	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄
	80-100	0.029	—	0.21	0.17	0.04	0.23	0.06	0.13	0.42	50.0	40.5	9.5	0.42	54.8	14.3	31.0	(Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, CaCl ₂ , CaSO ₄ , MgSO ₄
	0- 5	0.118	—	0.85	0.29	0.56	0.54	0.22	0.94	1.70	50.0	17.1	32.9	1.70	31.8	12.9	55.3	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃
中 部 地 区	5- 10	0.112	—	0.88	0.22	0.58	0.56	0.24	0.88	1.68	52.4	13.1	34.5	1.68	33.3	14.3	52.4	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	10- 20	0.116	—	0.90	0.17	0.61	0.54	0.20	0.94	1.68	53.6	10.1	36.3	1.68	32.1	11.9	56.0	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	20- 40	0.101	—	0.75	0.18	0.55	0.54	0.25	0.69	1.48	50.7	12.2	37.2	1.48	36.5	16.9	46.6	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl
	40- 60	0.099	—	0.69	0.16	0.56	0.46	0.20	0.75	1.41	48.9	11.3	39.7	1.41	32.6	14.2	53.2	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl
	60- 80	0.100	—	0.73	0.19	0.61	0.42	0.13	0.98	1.53	47.7	12.4	39.9	1.53	27.5	8.5	64.1	(Ca,Mg)CO ₃ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	80-100	0.101	—	0.74	0.20	0.63	0.42	0.12	1.03	1.57	47.1	12.7	40.1	1.57	26.8	7.6	65.6	Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃ , NaCl, Na ₂ CO ₃
	0- 5	0.702	—	1.37	6.46	2.06	1.41	1.20	7.28	9.89	13.9	65.3	20.8	9.89	14.3	12.1	73.6	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
	5- 10	0.702	—	1.36	6.46	2.05	1.40	1.20	7.27	9.87	13.8	65.5	20.8	9.87	14.2	12.2	73.7	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
西 部 地 区	10- 20	0.683	—	1.24	5.43	2.77	1.70	1.05	6.69	9.44	13.1	57.5	29.3	9.44	18.0	11.1	70.9	NaCl, (Ca,Mg)CO ₃ , CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
	20- 40	0.799	—	1.19	6.75	3.88	2.09	1.22	8.51	11.82	10.1	79.3	32.8	11.82	17.7	10.3	72.0	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃
	40- 60	1.038	—	1.27	10.11	5.41	3.25	1.72	11.82	16.79	7.6	60.2	32.2	16.79	19.4	10.2	70.4	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃
	60- 80	0.845	—	1.05	7.51	5.19	3.24	1.82	8.69	13.75	7.6	54.6	37.7	13.75	23.6	13.2	63.2	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃
	80-100	1.009	—	1.06	6.48	6.54	4.02	2.35	7.71	14.08	7.5	46.0	46.4	14.08	28.6	16.7	54.8	NaCl, CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , (Ca,Mg)CO ₃

* 郭時清 (1987)

からひいていったからであると考えられる。

5. おわりに

大陸上では、水⇌岩石の相互作用は激しく、ケイ酸塩岩石は化学風化をうけて粘土に変質し、山崩れや地すべりを起こすことは衆知の事である。日本では主としてCO₂が供給されるときに岩石からのCa²⁺とMg²⁺の溶出量が大きくなり、粘土が生成される。ただ地域によってはFeS₂やSが酸化されてH₂SO₄となりこれが水中に供給されて岩石の化学的風化が起こる⁶³⁾。すべり易い粘土が多量生産されるほど、山くずれの起こる確率も規模も大きくなる。北野は天然水中のCa²⁺+Mg²⁺またはHCO₃⁻+SO₄²⁻の量を測定することによって、山くずれの予知ができることを報告し、更にCO₂やH₂SO₄によって日本の各地河川の流域や全世界で1年間に生産される粘土量を推定した^{11-14,18-25)}。

CO₂やH₂SO₄が水に溶けこむと、水による岩石の化学的風化は大きくなるが、このとき他のイオンが溶けこんでいると、化学的風化が激増することも留意すべきことである。そのため、観光客の多く入る洞窟内の水蒸気とCO₂の濃度の監視は、空気⇌岩石間の相互作用を考えるうえで必要であり、その監視は現在も進行中である^{3,4,7,58)}。また、石窟周辺のH₂Sなどの観測も精力的に行われている。

以上述べてきた通り、地球環境問題のうち、地球温暖化問題と酸性雨問題は文化財保護を考えるうえで、十分に留意していかなければならない。我々は今後とも調査を行い、莫高窟壁画保存のための基礎的な地球化学的研究を継続する予定である。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては、文化庁、中国の国家文物局、甘肅省文化庁、敦煌研究院など多くの機関のお世話になった。これら諸機関はじめ関係の方々に深くお礼申上げる。また1993年10月3～8日、敦煌研究院で開かれた“シルクロード遺跡の保存の国際会議”への出席と、会議後敦煌周辺の陸水と析出塩の観察のため、著者の一人である北野康に対し費用助成をして下さった財団法人文化財保護振興会に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 朽津信明, 段修業: 敦煌莫高窟の地質環境, 保存科学, 31, 79-85, 1992
- 2) 朽津信明, 段修業: 敦煌莫高窟における塩類の晶出と壁画の劣化, 保存科学, 32, 28-34, 1993
- 3) 三浦定俊, 西浦忠輝, 李実, 張拥軍: 敦煌莫高窟における気象観測 (1) - 1988年春の温度・湿度変化について -, 保存科学, 29, 1-7, 1990
- 4) 三浦定俊, 西浦忠輝, 張拥軍, 王宝義: 敦煌莫高窟の気象観測 (2) - 1989年から1991年まで -, 保存科学, 31, 87-94, 1992
- 5) 東京国立文化財研究所: 敦煌文化財の保存修復に関する調査研究, 備忘録, pp.289, 1991
- 6) 東京国立文化財研究所: 国際共同研究・敦煌文化財の保存修復に関する調査研究, 論文集[1], pp.96, 1991
- 7) 敦煌研究院: 敦煌研究文集, 石窟保存篇・上 - 石窟の環境 (15論文), 石窟と壁画の破損機構 (16論文) -, pp.420, 1993
- 8) 敦煌研究院: 敦煌研究文集, 石窟保存篇・下 - 壁画顔料と結着材の分析 (11論文), 修復の技術と材料 (15論文) -, pp.325, 1993
- 9) 環境庁地球温暖化問題研究会編: NHK ブックス 地球温暖化を防ぐ, 日本放送出版協会,

pp.230, 1990

- 10) 環境庁長官官房総務課編：地球環境キーワード辞典，中央法規出版社，pp.155, 1990
- 11) 北野康，松野武雄：地球と環境の化学，岩波講座 現代化学 22，岩波書店，pp.261, 1980
- 12) 北野康：地球環境の化学，化学選書，裳華房，pp.237, 1984
- 13) 北野康：炭酸塩堆積物の地球化学－生物の生存環境の形成と発展，東海大学出版会，pp.391, 1990
- 14) 北野康：化学の目でみる地球の環境－空・水・土－，裳華房，pp.152, 1992
- 15) 北野康：地球化学の目でみる炭素の循環，地学雑誌，102 (6) 664-684, 1993
- 16) 北野康，田中正之：地球温暖化がわかる本，マクミラン・リサーチ研究所，pp.238, 1990
- 17) 田中正之：温暖化する地球，読売科学選書 23，読売新聞社，pp.227, 1989
- 18) 北野康，金森暢子：六甲山系，住吉川および芦屋川流域砂防調査報告書(第3回)，建設省近畿地方建設局，1-81, 1964
- 19) 北野康，加藤喜久雄，金森悟，金森暢子，吉岡龍馬：水質調査による岩石崩壊の予知の可能性，京都大学防災研究所年報，第10号A，557-587, 1967
- 20) 北野康，中村誠佑：山崩れと水質，施工技術，6，17-24, 1973
- 21) 北野康，中村誠佑：日本の主要河川流域において1年間に風化変質する鉱物および生成する粘土の量－河川水の化学組成に基いた推定－，自然災害資料解析，2，11-29, 1975
- 22) Kitano, Y.: Water-rock interaction and geochemical balance of major chemical elements—with emphasis of geochemical balance of calcium and carbon dioxide, *Acta Oceanographica Taiwanica*, 11, 40-48, 1980
- 23) Kitano, Y.: Water geochemistry, *Encyclopedia of Earth System Science*, Vol.4, Academic Press, 449-462, 1992
- 24) 北野康：NHK ブックス 水の科学，日本放送出版協会，pp.205, 1969
- 25) 中村誠佑：水質と岩石風化，宮崎大学工学部紀要，18，95-151, 1988
- 26) 山内豊聰：遺跡の技術と保存，土と基礎，40-1 (408)，1-6, 1992
- 27) 段修業：対莫高窟壁画制作材料的論議，敦煌研究，3，41-59, 1988
- 28) 別良選：毛鳥素沙地西部地区降水特征分析，中国沙漠，9，74-79, 1989
- 29) 科学技術庁研究開発局：砂漠化機構の解明に関する国際共同研究（平成2年度成果報告書）pp.264, 1991
 - ・中尾正義：1 (2) 周辺氷河の解析 p.61-65
 - ・石井武政，磯部一洋，宮田雄一郎，水野清秀，寺島滋，金井豊，田中剛，奥村晃史：2 (2)-① 砂漠の地質試料の鉱物的，化学的解析 p.102-113
 - ・岡田昭彦，矢吹貞代：2 (2) -② 砂漠の塩類の析出・集積機構の解明 p.114-130
 - ・木村忠志，米谷恒春：2 (4) -① 水文状態・水収支の調査 p.166-169
 - ・牛木久雄，高橋和也，増田彰正：2 (4) -② 同位体に基づく水の起源 p.170-181
 - ・藤谷徳之介，三上正男：2 (4) -③ 土壤水分収支と土壤水の動態調査 p.182-187
 - ・吉野正敏，河村武，安成哲三，甲斐憲次：3 (1) 既観測・蓄積データの収集・解析 p.188-191
- 30) Lerman, A.: Chemical equilibria and evolution of chloride brines, *Mineralog. Soc. Amer. Special Paper*, 3, 291-306, 1970
- 31) Bendor, Y.K.: Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age, *Geochim. Cosmochimica Acta*, 25, 239-260, 1960
- 32) Bendor, Y.K.: On the evolution of subsurface brines in Israel, *Chem. Geol.*, 4, 83-110,

1969

- 33) Neev, D. and Emery, K.O.: The Dead Sea, depositional processes and environments of evaporites, *Israel Geol. Surv. Bull.*, **41**, 1-147, 1967
- 34) Zak, I.: Sedimentology and bromine geochemistry of marine and continental evaporites in the Dead Sea basin, *Fourth Symposium on Salt. Northern Ohio Geol. Soc.*, Vol. 1, 349-361, 1974
- 35) Zak, I.: The geochemical evolution of the Dead Sea, *Fifth Symposium on Salt. Northern Ohio Geol. Soc.*, Vol. 1, 181-184, 1980
- 36) Zak, I. and Gat, J.R.: Saline waters and residual brines in the Shirazsavistan basin, *Iran. Chem. Geol.*, **16**, 179-188, 1975
- 37) Zak, I., Sakai, H. and Kaplan, I.R.: Factors controlling the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ isotopic ratios of ocean sulfates and interstitial sulfates from modern deep sea sediments, *Isotope Marine Chemistry* (Goldberg, E.D., Horibe, Y. and Saruhashi, K. eds.), Geochemistry Research Association (Tokyo), 339-373, 1980
- 38) 中井信之: 硫黄の循環と人間生活, 現代化学, **12**, 39-44, 1984
- 39) 功刀正行: 海洋起源の DMS, 化学と工業, **46**, 1131-1132, 1993
- 40) 諏訪兼位, 山崎一雄: 敦煌鳴沙山の砂, 地学研究, **34**, 69-81, 1982
- 41) 佐藤信次: 中国 I-中国の地史, 世界の地質 第 10 章, 岩波講座 地球科学 第 16 卷(都城秋穂編), 岩波書店, p.301-326, 1979
- 42) Kitano, Y. and Hood, D.W.: Calcium carbonate crystal formed from sea water by inorganic processes, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **18**, 141-145, 1962
- 43) Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H. and Zak, I.: The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation, *Chem. Geol.*, **28**, 199-260, 1980
- 44) 西川雅高, 溝口次夫, 金森悟, 金森暢子: 黄砂エアロゾル中の水溶性成分間イオンバランス, エアロゾル研究, **6**, 157-164, 1991
- 45) 北村守次, 杉山実, 大橋哲二, 中井信之: 硫黄安定同位体比からみた石川県の降水中硫黄イオンの起源の推定, 地球化学, **27**, 109-118, 1993
- 46) Nakai, N. and Jensen, M.L.: Sources of atmospheric sulfur components, *Geochem. Jour.*, **1**, 199-210, 1967
- 47) Nielsen, H.: Isotopic composition of the major contributors to atmospheric sulfur, *Tellus*, **26**, 213-221, 1973
- 48) 大泉毅, 福崎紀夫, 森山登, 漆山佳雄, 日下部実: 硫黄同位体比から見た大気降下物中硫黄の供給源-新潟県の場合, 日本化学会誌, No. 5, 675-681, 1991
- 49) 大気汚染研究協会: 黄砂エアロゾルに関する調査研究(昭和 63 年度環境庁委託業務結果報告書). pp.147, 1989
 - ・坂本和彦, 君島克憲, 及川喜久雄: 2. 水溶性イオンの分析, p.12-20
 - ・早川友邦, 坂本和彦: 炭素成分の分析. p.21-29
 - ・上田晃, 坂本和彦: 同位体比分析-主として硫黄同位体-. p.30-34
 - ・西川雅高, 金森悟, 溝口次夫: 黄砂エアロゾルの元素組成. p.35-44
 - ・金森悟, 金森暢子, 西川雅高, 溝口次夫: 黄砂エアロゾルの粒径別組成評価. p.45-58
- 50) Thode, H.G., Monster, J. and Dunford, H.B.: Sulfur isotope geochemistry, *Geochim.*

Cosmochimica Acta, 25, 159-174, 1961

- 51) Matsuo, S., Friedman, I. and Smith, G.I.: Studies of quaternary saline lakes—I, Hydrogen isotope fraction in saline minerals, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36, 427-435, 1972
- 52) Raab, M. and Spiro, B.: Sulfur isotopic variations during seawater evaporation with fractional crystallization, *Chem. Geol. (Isotope Geoscience Sect.)*, 86, 323-333, 1991
- 53) 名古屋大学水圏科学研究所編：大気水圏の科学「黄砂」. 古今書院, pp.328, 1991
 - ・石廣玉：1.3 黄砂の大陸—中国, pp.9-19
 - ・角皆静男：2.3.1 日本周辺域で観測された黄砂, p.85-98
 - ・植松光夫：2.3.2 太平洋上での黄砂観測, p.98-108
 - ・石坂隆：3.1 黄砂の性状と発源地の推定, p.109-123
 - ・金森悟, 金森暢子, 西川雅高, 溝口次夫：黄砂の化学像, p.124-156
 - ・岩坂泰信, 林政彦, 大和政彦：黄砂と大気質, p.250-255
 - ・角脇怜：黄砂と大気汚染, p.256-267
 - ・鶴田浩雄：黄砂と降水の化学組成, p.268-279
- 54) 田中茂, 田島将典, 橋本芳一：黄砂現象の大気エアロゾルの化学組成の変化, 日本化学会誌, 5, 713-719, 1986
- 55) 田中茂, 田島将典, 佐藤宗一, 橋本芳一：タクラマカン砂漠土壌と日本土壌の蛍光X線分析, X線分析の進歩, 17 253-264, 1986
- 56) Winchester, J.W. and Wang, M.X.: Acid-base balance in aerosol components of Asian-Pacific region, *Tellus*, 41 B, 323-337, 1989
- 57) 郭志清：我国沙漠地区沙丘的易溶盐含有量分布特征, 中国沙漠, 7, 50-62, 1987
- 58) 李実, 張拥軍, 三浦定俊, 西浦忠輝：敦煌莫高窟の気象観測, 敦煌研究, 22, 108-114, 1990
- 59) Kitano, Y. and Hood, D.W.: The influence of organic material on the polymorphic crystallization of calcium carbonate, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 29, 29-41, 1965
- 60) Kitano, Y.: The behavior of various inorganic ions in the separation of calcium carbonate from a bicarbonate solution, *Bull. Chem. Soc. Japan*, 35, 1973-1980, 1962
- 61) Kitano, Y. and N. Kanamori: Synthesis of magnesian calcite at low temperatures and pressure, *Geochem. Jour.* 1, 1-10, 1966
- 62) Kitano, Y., Park, K. and Hood, D.W.: Pure aragonite synthesis, *J. Geophys. Res.*, 67 4873-4874, 1963
- 63) 千木良雅弘：泥岩の化学風化—新潟県更新統灰爪層の例—, 地質学雑誌, 94, 419-431, 1988

The Chemical Composition of Land Waters in the Dunhuang Area and of Evaporites in Various Desert Areas of China

Yasushi KITANO*¹, Hisao MABUCHI*², Sadatoshi MIURA,
Tadateru NISHIURA, Chie SANO, Nobuaki KUCHITSU,
Takeo KADOKURA, Minoru KUSAKABE*³ and DUAN Xiuye*⁴

Water-rock and air-rock interactions should be studied for the conservation of the Mogao Grottoes. In view of the fact that global warming and acid rain are serious global environmental problems, we feel that our studies are important since global warming may increase the amount of rain and acid rain may increase the chemical weathering of rocks.

The purpose of the present report is to review the chemical compositions of land waters in the Dunhuang area and those of evaporites in various desert areas of China.

The authors have compared the chemical compositions of land waters in the Dunhuang area with those of various natural waters in the world such as river water, rain water and seawater, and also with that of the Dead Sea which forms evaporites such as calcium carbonate, calcium sulfate and sodium chloride. The comparison clearly shows that the chemical composition of land waters in the Dunhuang area is very characteristic: that is, the concentration of sulfate ion in the waters is abnormally high. To clarify the source of sulfate ions, the authors have tried the $\delta^{34}\text{S}$ measurements of sulfate ions in land water and also in gypsum evaporite ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) collected in the area. Since the $\delta^{34}\text{S}$ measurements for yellow sands transported from China to Japan have been carried out very actively in Japan, the authors have discussed the origin of sulfate in evaporites and yellow sands.

The formation of evaporites such as halite (NaCl) and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is often observed both inside and outside the Mogao Grottoes. The authors have already made clear that the efflorescence of halite and that of gypsum have flaked off the wall paintings of Grotto No. 194 and Grotto No. 53, respectively. Mr. Guo Shiqing reported water soluble chemical species such as Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Cl^- , HCO_3^- and SO_4^{2-} in sands of various desert areas in China. Based on these data, the authors have estimated the chemical compounds of evaporites formed in desert areas of China.

The authors will continue geochemical investigation on the natural waters and evaporites in the Dunhuang area in view of the conservation of the Mogao Grottoes.

* 1 professor emeritus, Nagoya University, Sugiyama Women's College

* 2 researcher emeritus, Tokyo National Research Institute of Cultural Properties

* 3 Institute for Study of the Earth Interior, Okayama University

* 4 Dunhuang Academy, China